



マイクロ波加熱のための液中照射用アンテナの開発

著者	村井 正徳
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	11301甲第17534号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00121528

むらい まさのり
氏 名 村 井 正 徳
研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械システムデザイン工学専攻
学 位 論 文 題 目 マイクロ波加熱のための液中照射用アンテナの開発
論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 高木 敏行 東北大学教授 堀切川 一男
東北大学教授 滝澤 博胤 東北大学准教授 内一 哲哉

論文内容要約

第1章 序論

一般的な工業用マイクロ波加熱装置は、マイクロ波発生装置、加熱対象物が入ったアプリケータ、その両者をつなぐ導波管、導波管の途中に設置する反射波対策のデバイス類で構成される。家庭用の電子レンジでは、低出力、短時間照射に限定することで、発生装置に廉価なものを採用し、反射波対策のデバイス類を省略して低価格を実現している。工業用マイクロ波加熱装置においては、高出力、高耐久の仕様のため、家庭用電子レンジほどの低価格化は難しいものの、反射波対策のデバイス類は、反射波が発生しないように設計することで省略が可能である。一方、タンクに充填した液体をマイクロ波加熱する場合、液面の上からマイクロ波を照射する構造では、充填量や照射角度等をアプリケータの設計時に考慮する必要があるなど、非常に高度な技術が必要である。バッチ式の液体濃縮のように処理中に充填量が増減する場合はさらに困難である。本論文では、充填量と反射波の問題を同時に解決する方法として、導波管からアンテナを介して加熱対象物である液体にマイクロ波を直接照射する方法を提案し、実用化を目指す。この照射方法では、加熱対象物に照射されたマイクロ波はすべて吸収され、反射波はアンテナでのみ発生する。そこで、矩形アンテナと円錐台アンテナの2種類について、数値解析により反射電力が最小になるように形状最適設計を行い、実験によりその効果を検証する。さらに、実験と数値解析から導波管長さについても入射電力の最大化に関して最適長さがあることを示し、その設計法を提案する。

第2章 導波管内に誘電体を充填したモデルの理論解析と有限要素法によるアンテナの形状最適設計

矩形導波管内に加熱対象物とアンテナに相当する誘電体を配置した Fig. 1 のようなモデルでは、電力の反射率がゼロになる理論最適解が式 (1) のようになることが有名である。

$$l = (2n-1)\lambda_{g2}/4, Z_2^2 = Z_1 Z_3 \quad (1)$$

ここに、 μ_i , ε_i , Z_i , λ_{gi} ($i=1, 2, 3$) はそれぞれ、各所の比透磁率, 比誘電率, 特性インピーダンス, 管内波長である。さらに、S 行列を使用し

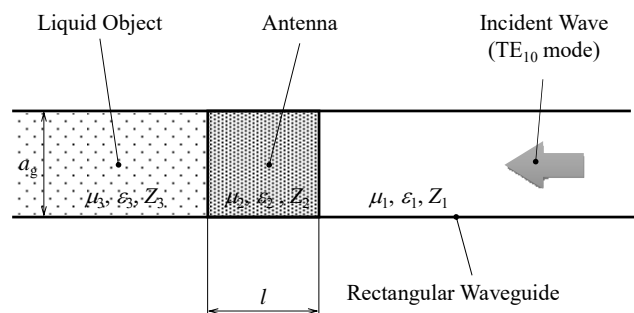


Fig. 1 Theoretical model that an antenna and a liquid object are parts of rectangular waveguide

た解析で、電力の反射率を理論的に求めることができる。一例として、加熱対象物の比誘電率を 67 とした場合の理論解析結果を 3 次元的に表示すると Fig. 2 のようになる。式(1)で求められる理論最適値の近傍は、下に凸の滑らかな曲面になっている。第 3 章、第 4 章で有限要素法による数値解析を利用して形状最適化を行う際には、この傾向を考慮して、最適化アルゴリズムを選択する。

第 3 章 矩形アンテナの反射電力をゼロにする形状最適設計及び試作評価

矩形アンテナは、矩形誘電体を金属製のタンクの底や側面にねじ止めし、その誘電体を通過してマイクロ波を給電する Fig. 3 のような構造である。主な用途は、液体の濃縮をする際の熱源供給に使われる。マイクロ波が通過する誘電体が矩形のため矩形アンテナと呼ぶ。

比誘電率と厚さを設計変数として、電力の反射率が最小になるように有限要素法を使用した数値解析により矩形アンテナの形状最適設計を行う。最適設計された矩形アンテナの電力の反射率の解析値は 0 % である。アンテナのみでは、水のように温度によって比誘電率が大きく変化する加熱対象物に対応することができない。実験では、解析法の検証に加えて、温度依存性の確認を行い、アンテナの適用範囲を検討する。

材料として、フッ素樹脂 (polytetrafluoroethylene: PTFE) とセラミック材料のコージライト、アルミナの温度依存性の解析結果と実験結果、最適設計したアンテナの解析結果を Fig. 4 に示す。解析結果と実験結果はよく一致してい

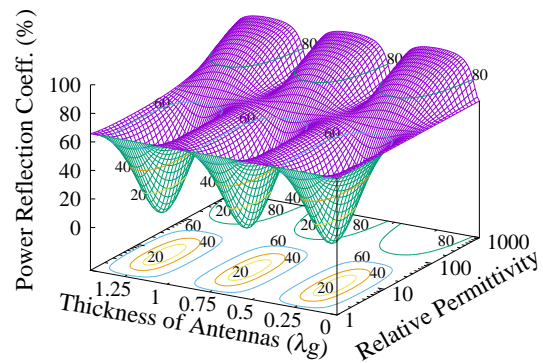


Fig. 2 Three-dimensional indication of theoretical results

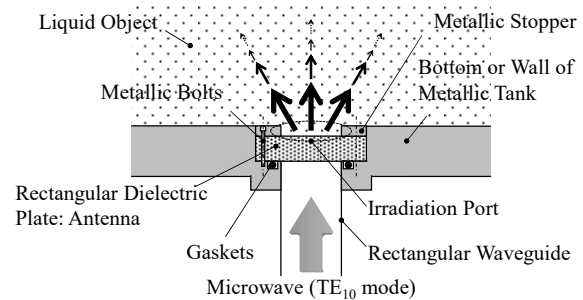


Fig. 3 Structure of a rectangular antenna

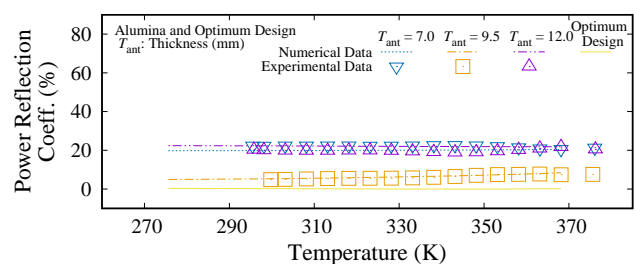
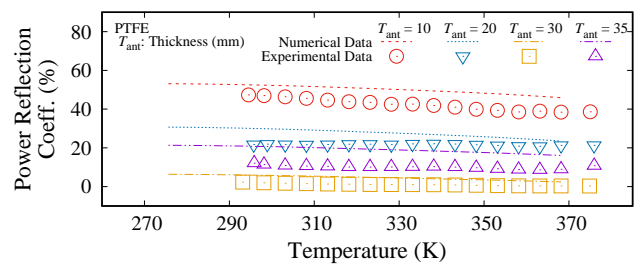
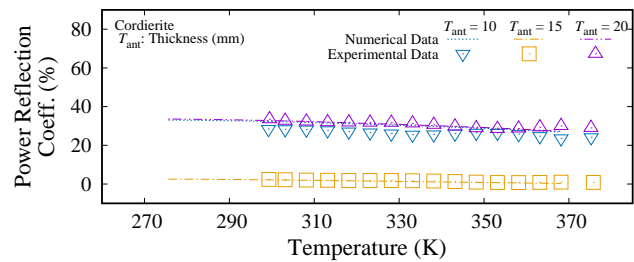


Fig. 4 Numerical and experimental results for the temperature dependence of the power reflection coefficient

るので、解析法の妥当性が検証された。最適設計した矩形アンテナに加えて、コージライト製で厚さ 10 mm、PTFE 製で厚さ 30 mm の矩形アンテナでも、電力の反射は十分に小さく、温度により比誘電率が大きく変化する水に対しても、反射対策のデバイスを省略した構成が可能である。

第4章 円錐台アンテナの反射電力をゼロにする形状最適設計及び試作評価

円錐台アンテナは、液体の加熱対象物を入れた金属製のタンクの下側にテーパ状の穴を開け、Fig. 5 のように樹脂製の円錐台の栓をする構造になっている。タンクの内側は円形のマイクロ波照射口が見えるのみで、凹凸がなく、矩形アンテナよりも洗浄性が向上している。主な用途は液体の濃縮に加えて、柑橘類の果皮を粉碎したものなどのペースト状の対象物を蒸留する際の熱源供給に使われる。

材料を PTFE とし、開口径、厚さ、側面の傾き角を設計変数として、電力の反射率が最小になるように有限要素法を使用した数値解析により形状最適設計を行う。アンテナのみでは、水のように温度によって比誘電率が大きく変化する加熱対象物に対応することができない。実験では、解析法の検証に加えて、温度依存性の確認を行い、アンテナの適用範囲を検討する。

温度依存性の実験結果を Fig. 6 に示す。形状最適設計したアンテナと既存のアンテナを比較検討し両者は同等の性能としている。また、既存アンテナは、電力の反射率が小さく、反射対策のデバイスを省略した構成も可能である。

第5章 導波管長さの照射電力量への影響と入射電力でのアンテナ特性の評価

導波管長さと加熱対象物の昇温速度の間に相関関係があることが従来から知られているが、第3章、第4章で使用したアンテナの設計法では、導波管長さの影響が無視される。そこで、昇温速度が変化する原因を追究するため、導波管長さをパラメータとし、水を加熱中の入射電力、反射電力、マイクロ波周波数、水温を実験により調べ、導波管長さが変化した場合のマグネトロンの発振状態の変化について検討する。また、加熱対象物の一部とマグネトロンを含む導波管全体を解析領域とした数値解析から、昇温速度と導波管長さの関係を考察し、最適導波管長さの設計法を提案する。

Fig. 2 に示したものと同様に導波管内に加熱対象物、アンテナを配置したモデルで、加熱対象物の比誘電

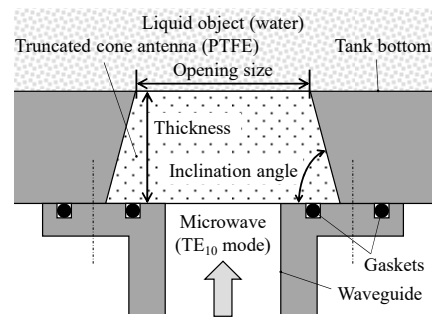


Fig. 5 Structure and the three design parameters for a truncated-cone antenna

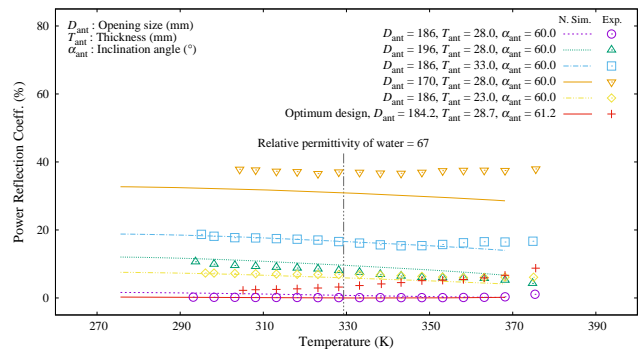


Fig. 6 Numerical and experimental results for the temperature dependence of the power reflection coefficient

率を 67, 誘電正接を 0.087 とする。導波管長さ
と対象物での単位時間当たりの発熱量の関係を
有限要素法による数値解析で求めると, Fig. 7
のようになる。単位時間当たりの発熱量が最大
になる長さが, 比誘電率が理論最適値の 7.08 の
前後で大きく変わる。Fig. 8 に示すように, 主
な反射波の発生場所を考慮すると, 導波管が空
洞共振器を形成する場合に, 最大の発熱量にな
っている。実験結果から, 導波管長さが変化
した場合のマグネトロンの発振周波数の変化
は極めて微小で, 昇温速度の変化に大きな影
響はないと考えられる。以上から導波管とア
ンテナが空洞共振器を形成している場合に,
対象物の昇温速度が最大になる。また, アン
テナの設計時に, S-パラメータの偏角を利用
すると, 導波管長さを判断することができる。

第6章 結論

矩形アンテナの形状最適設計, 円錐台アンテナの形状最適設計, 導波管長さを変化させた場合の数値解析
と実験から以下の結論を得た。

矩形アンテナの形状最適設計から, 反射が十分に小さく, 反射対策のデバイス類が省略可能な矩形アンテ
ナが示された。このアンテナは, 液体濃縮に使用可能である。

円錐台アンテナの形状最適設計から, 液体濃縮に加えて, ペースト状の対象物の蒸留に使用可能で, 反射
が十分に小さく, 反射対策のデバイス類が省略可能な円錐台アンテナが得られた。

導波管長さが変化した場合のマグネトロンの発振周波数の変化は微小で, 加熱対象物の昇温速度の変
化に大きな影響はない。導波管が空洞共振器を形成する場合に, 加熱対象物の昇温速度は最大になり, ア
ンテナの設計時に, S-パラメータの偏角を利用することで最適長さを求めることができる。

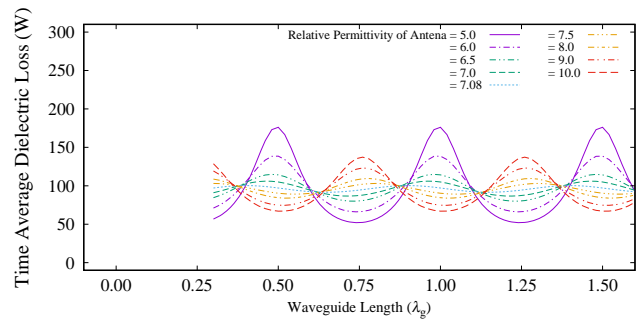


Fig. 7 Numerical results of the relation between the time average dielectric loss in the objects and the waveguide length

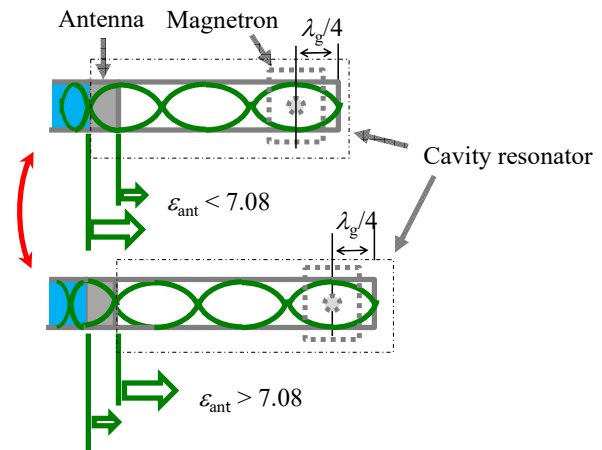


Fig. 8 Cavity resonators in waveguides